

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제27권 제6호, 2022년 11월 (JBE Vol.27, No.6, November 2022)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2022.27.6.848>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템

류 영 일^{a)}, 김 건 형^{b)}, Andres Cabrera^{b)}, JoAnn Kuchera-Morin^{b)}, 정 세 훈^{c)}, 류 은 석^{a)†}

360-degree Video Streaming System for Large-scale Immersive Displays

Yeongil Ryu^{a)}, Kon Hyong Kim^{b)}, Andres Cabrera^{b)}, JoAnn Kuchera-Morin^{b)}, Sehun Jeong^{c)},
and Eun-Seok Ryu^{a)†}

요 약

본 논문은 일반적으로 사용되는 2D 디스플레이 또는 HMD (Head-Mounted Display) 기반 VR (Virtual Reality, VR) 서비스에서 탈피하여, 대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 Phase 1, 2, 3의 연구개발 단계를 밟아 6DoF (Degrees of Freedom) 시점 자유도를 지원하는 360도 비디오 스트리밍 시스템을 개발하는 것을 최종목표로 하고 있으며, 현재는 Phase 1: 대형 가상현실 공연장을 위한 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입의 개발까지 완료되었다. 구현된 스트리밍 시스템 프로토타입은 서브픽처 기반 Viewport-dependent 스트리밍 기술이 적용되어 있으며, 기존 방식과 비교하였을 때 약 80%의 비트율 감소, 약 543%의 영상 디코딩 속도 향상을 확인하였다. 또한, 단순 구현 및 성능평가에서 그치지 않고, 실제 미국 UCSB (University of California, Santa Barbara)에 위치한 대형 가상현실 공연장 AlloSphere에서의 시범방송을 수행하여, 향후 Phase 2, 3 연구단계를 위한 연구적 기반을 마련하였다.

Abstract

This paper presents a novel 360-degree video streaming system for large-scale immersive displays and its ongoing implementation. Recent VR systems aim to provide a service for a single viewer on HMD. However, the proposed 360-degree video streaming system enables multiple viewers to explore immersive contents on a large-scale immersive display. The proposed 360-degree video streaming system is being developed in 3 research phases, with the final goal of providing 6DoF. Currently, the phase 1: implementation of the 3DoF 360-degree video streaming system prototype is finished. The implemented prototype employs subpicture-based viewport-dependent streaming technique, and it achieved bit-rate saving of about 80% and decoding speed up of 543% compared to the conventional viewport-independent streaming technique. Additionally, this paper demonstrated the implemented prototype on UCSB AlloSphere, the large-scale instrument for immersive media art exhibition.

Keyword : Virtual reality, 360-degree video, Large-scale immersive display, Viewport-dependent streaming, Subpicture

Copyright © 2022 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

1. 서론

코로나바이러스감염증-19 (COVID-19)가 전 세계적으로 유행함에 따라 교육, 근로, 외식과 같은 기본적인 사회활동 뿐만 아니라, 영화 및 여행과 같은 엔터테인먼트 산업 전반적인 분야에서도 비접촉 커뮤니케이션 중심의 언택트 (Untact) 서비스들이 빠르게 개발되고 있다. 엔터테인먼트 산업 중에서도 다수의 관객과 공연자 간의 실시간 커뮤니케이션이 중요한 공연 분야 또한 온라인을 통한 언택트 (Ontact) 서비스로 빠르게 전환되고 있지만^[1], 기존 PC나 스마트폰과 같은 전통적 2D 화면으로는 사용자들에게 충분한 현장감 및 몰입감을 제공하기 힘들다. 이를 극복하기 위하여 해외 유명 가수들 및 국내 K-Pop 가수들은 가상현실 (Virtual Reality, VR), 증강현실 (Augmented Reality, AR) 및 홀로그래피 (Holography) 등과 같은 몰입형 미디어를 활용한 공연을 새롭게 시도하고 있다^[2,3].

몰입형 미디어는 일반적으로 전통적인 2D 비디오와는 다르게 사용자와의 상호작용을 통하여 해당 콘텐츠의 현장감 및 몰입감을 다양한 감각의 정보를 통하여 사실적으로 제공한다. 국제 비디오 부호화 표준화 단체인 MPEG (Moving Picture Experts Group)은 몰입형 미디어 분야 전반에 걸친 핵심기술들을 MPEG-I (Immersive) 프로젝트를 통하여 2016년부터 공식적으로 표준화해오고 있다. MPEG-I는 MPEG-I 요구사항, 몰입형 미디어의 주요 사용 시나리오 및 아키텍처를 정의하는 Part 1: Immersive Media Architectures부터, 기존 HEVC (High Efficiency Video Coding) 표준을 대체할 차세대 압축 기술인 VVC (Versa-

tile Video Coding) 표준화를 수행하는 Part3: Versatile video Coding, 몰입형 오디오를 위한 규격을 정의하는 Part 4: Immersive Audio, 몰입형 미디어 서비스 구현에 필요한 핵심 기술로 주목받는 포인트 클라우드 (Point cloud)의 비디오 기반 압축 기술 표준을 정의하는 Part 5: Visual Volumetric Video-based coding (V3C) and Video-based Point Cloud Compression (V-PCC) 등을 포함한 몰입형 미디어 서비스 전반에 대한 핵심기술 표준을 제정한다^[4].

이처럼 몰입형 미디어 기술은 학계 및 산업계로부터 엔터테인먼트 시장을 이끌어 갈 차세대 성장동력으로 주목받고 있으나, HMD (Head-Mounted Display)를 활용한 VR 서비스를 이용할 때 발생하는 VR 멀미^[5], 몰입형 미디어의 매우 높은 데이터 처리 요구량, 몰입형 비디오 부호화/복호화 연산 복잡도 등의 이유로 기대만큼 몰입형 미디어 서비스의 시장은 확대되지 못하고 있다. 또한, 현재 서비스되고 있는 대부분의 몰입형 미디어 서비스의 경우, 촬영된 360도 VR 영상을 단순히 HMD로 재생하는 방식의 서비스로 국한되어 있으며, HMD를 활용하지 않는 몰입형 가상현실 공연의 경우에는 몰입형 미디어가 공연의 주요 매체로써 활용되기 보다는 하나의 특색 있는 무대장치 수준에 머물러 있는 것이 현실이다. 본 논문은 이러한 문제점을 해결하고, 초고해상도 몰입형 미디어를 활용한 대형 가상현실 공연 스트리밍 서비스의 보급을 위하여, 대형 가상현실 공연장에 최적화된 360도 비디오 스트리밍 시스템을 제안한다.

본 논문은 1장 서론에 이어, 2장에서 최신 비디오 부호화 및 360도 비디오 스트리밍 기술 관련 연구동향에 대해 설명한다. 3장에서는 제안하는 대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템을 위한 연구 로드맵을 제시하고, 현재까지 개발된 시스템 프로토타입의 구조 및 동작방식을 설명한다. 4장에서는 구현된 프로토타입의 성능평가를 실시하며, 5장에서는 결론 도출 및 향후 연구계획을 설명한다.

II. 관련연구

1. H.266/VVC 비디오 부호화 표준

VVC (혹은 H.266) 비디오 부호화 표준은 ITU-T VCEG

a) 성균관대학교 컴퓨터교육학과(Department of Computer Science Education, Sungkyunkwan University)

b) Media Arts and Technology, University of California, Santa Barbara

c) 성균관대학교 컴퓨터교육과(Department of Computer Education, Sungkyunkwan University)

‡ Corresponding Author : 류은석(Eun-Seok Ryu)

E-mail: esryu@skku.edu

Tel: +82-2-760-0677

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4894-6105>

※ This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.RS-2022-00167169, Development of Moving Robot-based Immersive Video Acquisition and Processing System in Metaverse).

· Manuscript August 18, 2022; Revised October 11, 2022; Accepted October 11, 2022.

(Video Coding Experts Group)과 ISO/IEC MPEG (Moving Picture Experts Group)이 공동으로 조직한 JVET (Joint Video Experts Team)에서 2020년에 표준화를 완료한 최신 비디오 부호화 표준이다^[6,7]. VVC는 기존에 4K, 8K UHD (Ultra High-Definition) 영상의 지원을 목표로 개발된 HEVC 표준과는 다르게, HDR (High Dynamic Range), WCG (Wide Color Gamut), 스크린 콘텐츠 (Screen content), 360도 영상 지원 등 광범위한 미디어 서비스에서의 활용을 목표로 개발되었다. 해당 목표를 달성하기 위하여 VVC 코덱 내 각 모듈은 기존 HEVC 대비 더 정교하고 향상된 기술이 적용되었으며, 약 두 배 향상된 압축성능을 제공하지만 더 복잡해진 인코딩 및 디코딩 알고리즘으로 인하여 더 증가된 연산 복잡도를 가진다^[8].

화면 내 예측, 화면 간 예측, 변환 및 양자화 등과 마찬가지로, VVC의 화면 분할 구조 또한 기존 HEVC에서 사용된 분할 방식의 틀을 유지하면서 새로운 기술이 추가되었다. 비디오 데이터의 NAL (Network Abstraction Layer) 유닛 기반 패킷화를 위한 슬라이스 (Slice), 그리고 초고해상도 영상의 병렬처리를 위하여 HEVC에서 처음 도입된 타일 (Tile)은 VVC에서도 동일하게 지원된다. 그뿐만 아니라, VVC 표준에는 서브픽처 (Subpicture)라는 새로운 화면 분할 방식이 추가되었는데, 서브픽처는 사각형 형태로 영상을 분할하고, 각 분할된 영역이 독립적으로 부호화 및 복호화 처리될 수 있도록 지원하며, 부호화 된 비트스트림 수준에서 각 서브픽

처를 개별적으로 추출하여 전송할 수 있도록 하는 기능을 제공한다^[9]. 그림 1은 VVC에서의 슬라이스, 타일, 그리고 서브픽처를 활용한 영상 분할 예시를 보여준다.

서브픽처는 독립적으로 부/복호화 가능한 영상 내 분할된 영역들을 추출하여 개별적으로 전송할 수 있는 기능을 제공한다는 측면에서, HEVC 표준화 이후에 타일 기반 영상 분할 기법의 확장으로서 제안된 MCTS (Motion-Constrained Tile Sets) 기술과 유사하다고 볼 수 있으나 몇 가지 차이점이 존재한다. 첫 번째로 MCTS의 경우 화면 간 예측 시, 모션 벡터가 가리킬 수 있는 범위를 각 타일 내부로 제한하여 각 타일의 추출 기능을 지원하지만, 서브픽처의 경우에는 영상 샘플을 각 서브픽처 경계에 패딩 (Padding)함으로써, 모션 벡터가 가리킬 수 있는 범위를 각 서브픽처 외부 영역까지 확장할 수 있다. 두 번째로는 부호화 된 픽처로부터 서브픽처를 추출 시, 추출된 서브픽처의 SH (Slice Header) 및 PH (Picture Header)를 수정할 필요가 없다는 점이다. 반면, MCTS 기반의 서브 비트스트림 추출의 경우는 SH에 정의되어 있는 슬라이스 주소 등의 정보를 수정해야 한다. 비디오 시퀀스 내의 각 픽처를 서브 비트스트림으로 추출 가능한 다수의 영역으로 분할하면 SH의 개수는 증가하게 되고, SH 수정이 필요한 MCTS 기반 서브 비트스트림 추출은 비디오 어플리케이션 시스템의 연산량을 상당히 증가시킨다. SPS (Sequence Parameter Set) 및 PPS (Picture Parameter Set)과 같은 파라미터 셋은 서브픽처를 사용할 때, 또는 MCTS를 사용할 때, 두 경우 모두 수정이 필요하지만, SH와 비교했을 때 그 수가 많지 않기 때문에 비디오 어플리케이션 시스템에 미치는 영향은 상대적으로 크지 않다. 서브픽처와 MCTS의 세 번째 차이점은 Mixed NAL unit types의 지원 여부이다. Mixed NAL unit types는 하나의 픽처 안에 포함되어 있는 VCL (Video Coding Layer) NAL unit들이 서로 다른 타입을 가질 수 있도록 하는 기술을 뜻한다. 기존 AVC (Advanced Video Coding) 및 HEVC와는 다르게 VVC는 Mixed NAL unit types를 지원하여, 픽처 수준뿐만 아니라 서브픽처 수준에서의 Random access를 가능하게 한다. 이는 비디오 전송 간에 비디오 전체가 아니라, 몇 개의 서브픽처들만 추출하여 서브 비트스트림을 구성하여 전송할 때 유용하게 작용한다. 예를 들어, 서브 비트스트림에 포함되는 서브픽처 리

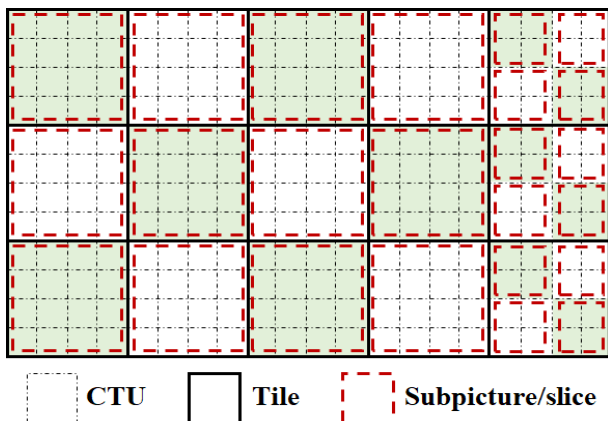


그림 1. 15개 타일, 24개 슬라이스, 24개 서브픽처로 분할된 영상의 예시
 Fig. 1. An example of partitioning a picture into 15 tiles, 24 slices, and 24 subpictures

스트가 변경되는 경우, 모든 서브픽처들을 IRAP (Intra Random Access Pictures) 타입의 NAL 유닛으로 부호화 할 필요없이, 서브 비트스트림에 새롭게 포함되는 서브픽처만 IRAP 타입의 NAL 유닛으로 부호화 하면 된다는 의미이다. 이를 통하여 서브 비트스트림에 포함되어 있던 기존 서브 픽처들은 화면 간 예측을 지원하는 NAL 유닛으로 부호화 되어 전체적인 압축률 향상에 기여한다.

이러한 우수한 압축능력과 광범위한 분야에서의 유용성 덕분에 VVC는 현재 학계 및 산업계에서 주목을 받으며 활발히 보급이 진행되고 있다. 단순한 상업적 용도뿐만 아니라, 여러 연구기관에서는 일반 사용자 및 다른 연구자들을 위하여 VVC 오픈소스 소프트웨어를 배포하고 있다. 대표적인 VVC 오픈소스 소프트웨어로는 JVET에서 배포하는 VVC 표준의 참조 소프트웨어 VTM^[10], 독일 Fraunhofer HHI에서 배포하는 VVC 인코더 VVenC^[11] 및 디코더 VVDeC^[12], 프랑스 INSA Rennes의 OpenVVC^[13]가 있다. VTM은 VVC 표준의 레퍼런스 소프트웨어로써 표준기술의 성능검증을 목표로 하여 구현되었다. 이 때문에 VTM은 VVC 표준의 사양이 충실히 반영되어 개발되었다는 장점을 갖지만, VVC 표준 코딩 툴(Tool)들의 압축성능을 평가하는 데 초점이 맞춰져 개발된 까닭에 인코딩 및 디코딩 처리 속도 측면에서의 최적화가 되어 있지 않다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 Fraunhofer HHI는 2020년 9월에 VVenC 및 VVDeC를 배포하였다. VVenC 및 VVDeC는 VTM과 비슷한 수준의 압축성능을 향상된 인코딩 및 디코딩 속도와 함께 지원하는 것을 목표로 구현되었으며, 실제로 VVC 인코더로 부호화 된 UHD 비디오의 실시간 디코딩을 지원한다. Fraunhofer HHI는 VVenC 및 VVDeC의 구현을 위하여, VTM의 소스코드를 기반으로 하여 성능의 병목현상을 최소화하도록 소프트웨어 구조를 재설계하고, SIMD (Single Instruction Multiple Data)와 병렬처리를 적용하였다. 이와 같은 최적화 작업을 통하여 가속화된 인코딩 및 디코딩 속도 외에도, VVenC와 VVDeC는 VVC 표준의 레퍼런스 소프트웨어인 VTM의 소스코드를 기반으로 구현되었기 때문에 VVC 표준에 포함된 대부분의 코딩 옵션을 지원한다는 장점이 있다. Fraunhofer HHI에 따르면 VVenC는 VTM 인코더와 비슷한 수준의 압축성능을 제공하면서, 적게는 14배, 최대 1400배만큼의 인코딩 속도가 향상되었다^[14]. VVDeC의

경우에는 VTM 디코더와 비교하였을 때 약 2배에서 10배만큼 디코딩 속도가 향상되었다^[15]. 마지막으로 오픈소스 VVC 디코더인 OpenVVC는 SIMD 및 병렬처리를 통하여 VVC 디코딩 프로세스를 최적화하여, VVDeC와 비교하였을 때 비슷한 수준의 디코딩 속도를 제공하면서 더 낮은 메모리 공간을 요구한다^[16]. 하지만 대부분의 VVC 인코더에서 생성된 비트스트림을 디코딩 할 수 있는 VVDeC와는 다르게 아직 부분적으로 지원하지 않는 VVC 하이레벨 신택스 (High-level syntax)가 존재한다는 단점이 있다.

2. 360도 VR 비디오 스트리밍

360도 VR 비디오는 몰입형 미디어의 일종으로, 사용자가 콘텐츠 내 전방위 공간 안에서 시점의 방향 및 위치를 변화시키며 영상 콘텐츠를 감상할 수 있다는 특성을 가지며, 지원 가능한 사용자 움직임 자유도에 따라 3DoF (Degrees of Freedom) 또는 6DoF 360도 VR 비디오로 분류된다. 3DoF 360도 VR 비디오는 고정된 위치에서의 사용자 시점 방향만을 트래킹 (Tracking)하며, Yaw, Pitch, Roll의 3축 회전을 통한 사용자의 시점방향 전환을 지원한다. 이에 반해 6DoF는 사용자 시점 방향뿐만 아니라 x, y, z 3축의 사용자 시점위치 변화까지 추가적으로 지원하여, 더 높은 수준의 자유도 및 몰입감을 사용자에게 제공할 수 있다.

360도 VR 비디오를 전송하기 위해서는 일반적으로 ERP (Equirectangular Projection), 큐브맵 (Cubemap) 등과 같은 방식으로 360도 VR 영상을 2D 영상으로 프로젝션하고, 프로젝션 된 2D 영상을 비디오 코덱을 사용하여 압축하여 전송하는 과정을 거친다. 이 때, 360도 VR 비디오를 전송하는 방식은 크게 Viewport-independent streaming과 Viewport-dependent streaming 기법으로 분류된다^[17]. Viewport-independent streaming 기법은 사용자의 시점 정보를 고려하지 않고, 360도 VR 영상 데이터 전체를 사용자에게 전송하는 단순한 전송방식이다. 이 같은 단순한 전송방식 덕분에 Viewport-independent streaming 기법을 사용하는 360도 VR 비디오 스트리밍 시스템은 구현이 쉽고, 기존 2D 비디오에 활용되는 MPEG DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP)와 같은 전통적인 적응적 스트리밍 기술도 비교적 수월하게 적용 가능하다. 하지만 사용자가 360도

VR 공간 안에서 전방위 영상 전체를 동시에 시청하는 것이 아니라, 제한된 시야각으로 360도 VR 영상 중 일부분만을 시청하는 360도 VR 비디오 시스템의 특성을 고려하여 스트리밍하는 Viewport-dependent streaming 기법에 비하여, 약 30% 감소된 비디오 코딩효율을 보인다는 단점이 존재한다^[18]. 반면에 Viewport-dependent streaming의 경우, 360도 VR 영상 내에서 사용자 ROI (Region Of Interest)의 영상 데이터와 그 외 영상 데이터 간의 품질을 비대칭적으로 조절하거나, 현재 사용자의 뷰포트 (Viewport) 내에 포함되어 있는 영상 데이터만을 추출하여 전송하는 등의 효율적인 방식으로 360도 VR 영상을 전송한다. 그 예로, 다수의 타일로 분할된 영상의 사용자 ROI를 Saliency map을 통하여 예측하고, 예측된 ROI에 포함된 타일들을 다른 타일들보다 더 높은 품질로 인코딩하여 서비스하는 기법^[19], 그리고 타일과 SHVC (Scalable High Efficiency Video Coding)를 활용하여 기본 비디오 데이터인 BL (Base Layer)는 모든 타

일을 전송하고, 고품질 비디오 데이터인 EL (Enhancement Layer)는 사용자 뷰포트 안에 포함되어 있는 타일만 전송하는 기법^[20] 등이 제안되었다. 이처럼 360도 VR 비디오 스트리밍 시에 Viewport-dependent streaming 기법을 활용하면 저지연, 고품질의 서비스를 사용자에게 제공할 수 있다.

III. 제안하는 대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템

본 장에서는 다수의 프로젝터 및 입체음향 장비로 구성되어 있는 구 형태 대형 가상현실 공연장인 AlloSphere를 소개하고, 이에 최적화된 360도 VR 비디오 스트리밍 시스템을 제안한다. 본 논문이 제안하는 시스템은 Phase 1) 대형 가상현실 공연장을 위한 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입 개발, Phase 2) 실시간 3DoF 360도 비디오 취득 및 스트리밍 시스템 개발, 그리고 최종적으로 Phase 3) 로봇 기반의 이동형 6DoF VR 스튜디오 및 실시간 비디오 스트리밍 시스템 개발, 총 3단계의 연구 로드맵을 기반으로 연구개발 중이다. 현재는 미국 UCSB (University of California, Santa Barbara)의 MAT (Media Arts and Technology) 소속 JoAnn Kuchera-Morin 교수가 이끄는 AlloSphere Research Team과의 협업을 통해 대형 가상현실 공연장인 AlloSphere를 활용한 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입을 구현 완료하였고, 구현된 프로토타입 시스템을 활용한 AlloSphere에서의 시범방송 수행까지 완료하여, 연구 로드맵 Phase 1까지의 연구목표

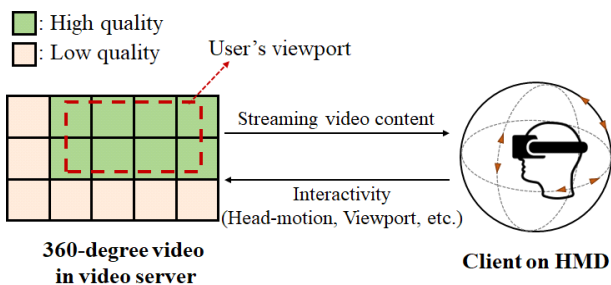


그림 2. 사용자 뷰포트 내의 타일의 차별적 품질제어를 통한 Viewport-dependent streaming 기법의 예시
Fig. 2. An example of viewport-dependent streaming technique using video quality adaptation

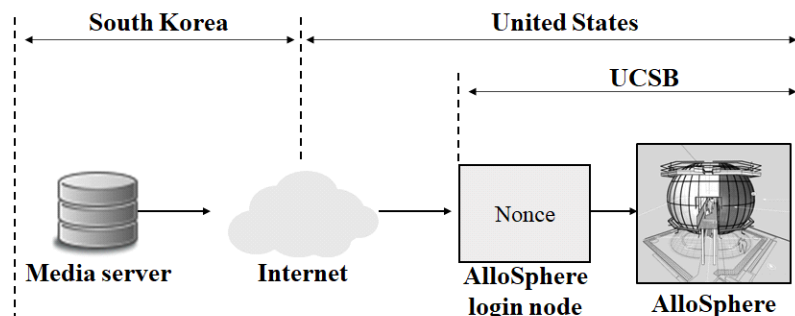


그림 3. 제안된 대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입의 구조
Fig. 3. Architecture for the proposed 360-degree video streaming system prototype

를 달성하였다. 그림 3은 대한민국에 위치한 미디어 서버로부터 인코딩된 3DoF 360도 VR 비디오를 미국 UCSB에 위치한 AlloSphere로 스트리밍 하는 Phase 1 프로토타입의 시스템 구조를 나타낸다.

AlloSphere는 미국 캘리포니아 UCSB에 위치한 3층 규모의 대형 멀티모달 가상현실 시설로써 전방위 입체영상 및 음향을 다수의 사용자들에게 동시에 전달할 수 있다^{21, 22}. AlloSphere는 주로 미디어 아트 콘텐츠 전시, 그리고 다양한 연구분야의 고차원적 복합 정보의 디스플레이 및 사용자와의 인터랙션 등과 같은 높은 몰입도의 가상현실 환경에서의 다양한 경험 제공에 활용된다. AlloSphere의 구조는 그림 4에서 볼 수 있듯이, 천공된 알루미늄 스크린으로 이뤄진 5m 반경 캡슐 형태로 설계되었으며, 또한 반향이 거의 일어나지 않도록 고려되어 설치되었다. 그 중심부에는 사용자들의 관람을 위한 약 2m 너비의 다리가 설치되어 있고, 최대 30명의 사용자들을 동시에 수용할 수 있다. 또한, AlloSphere는 전방위 입체영상, 고해상도의 3D 공간 음향, 그리고 자연스러운 인터랙션을 사용자에게 제공하기 위한 26대의 프로젝터, 55대의 스피커, 광섬유 네트워크로 연결된 17대 이상의 워크스테이션으로 구성되어 있으며, 이 외에도 컨트롤러, 아이패드, 터치스크린 등 다양한 인터랙션 디바이스와 연동이 용이하도록 구현되어 있다.

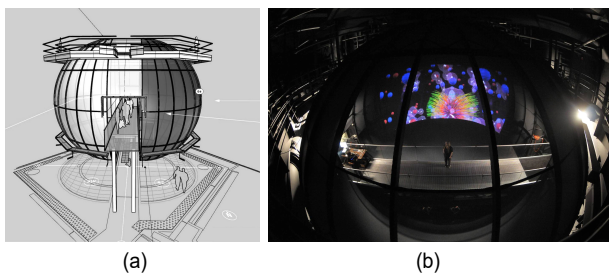


그림 4. (a) AlloSphere의 CAD 모델, (b) 위에서 바라본 AlloSphere의 모습
 Fig. 4. (a) CAD model of AlloSphere, (b) A view of the AlloSphere from above

이처럼 다기종의 장비들로 구성되어 있는 AlloSphere를 효율적으로 제어하기 위하여, JoAnn Kuchera-Morin 교수 연구팀은 AlloLib^[23]이라는 소프트웨어 프레임워크 라이브러리를 자체 개발하여 사용 중이다. AlloLib은 다양한 환경에 대응할 수 있도록 모듈성과 크로스 플랫폼을 고려하여

개발되었다. AlloLib을 통하여 개발된 어플리케이션은 하나의 소스코드로 일반 데스크탑은 물론, AlloSphere 및 다양한 가상현실 하드웨어 셋업에서 구동 가능하다.

Phase 1에서 구현된 대형 가상현실 공연장을 위한 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입은 AlloSphere 디스플레이 서브시스템에 최적화되어 개발되었다. AlloSphere의 디스플레이 서브시스템은 그림 5와 같이 GR (Graphic Renderer)01부터 GR14로 각각 명명된 14대의 워크스테이션, 그리고 26대의 프로젝터로 구성되어 있다. 14대의 워크스테이션은 모두 광섬유 네트워크로 연결되어 있으며, GR01을 제외한 13대의 워크스테이션에는 각각 2대의 프로젝터들이 연결되어 있다. GR01은 디스플레이 서브시스템 내에서 출력할 비디오 데이터를 GR02-GR14로 브로드캐스트하는 역할을 수행하고, 나머지 워크스테이션들은 GR01로부터 전송받은 비디오 데이터를 렌더링하여 연결된 2개의 프로젝터로 출력하는 역할을 수행한다.

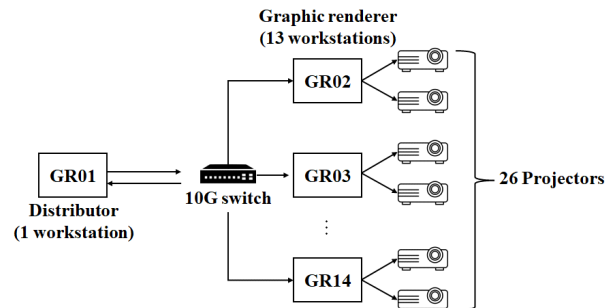


그림 5. 14대 워크스테이션 및 26대 프로젝터로 구성된 AlloSphere의 디스플레이 서브시스템

Fig. 5. AlloSphere display subsystem with 14 workstations and 26 projectors

AlloSphere 내의 렌더링 워크스테이션(GR02-GR14)들은 하나의 영상을 2대의 프로젝터로 출력하기 위하여 Nvidia Mosaic 기술을 사용하며, 필요한 화면 위치 및 해상도 등의 메타데이터는 파일로 따로 관리된다. 메타데이터 중에는 다수의 프로젝터를 통하여 비평면 스크린에 정확한 영상을 투사하기 위한 캘리브레이션 정보가 포함되어 있으며, 해당 정보는 사전에 다수의 카메라를 이용한 캘리브레이션 작업을 통해 계산되어 저장된다. 캘리브레이션 정보는 프로젝터로부터 투사된 영상 내 각 픽셀이 전체 360도 가상공간 내에서 위치하고 있는 좌표정보가 포함되어 있다.

AlloSphere는 그림 6과 같이 각 프로젝터가 투사하는 영상들 간의 매끄럽게 연결되도록, 캘리브레이션 정보에 기반하여 일정 부분만큼 포개어 지게 영상을 출력한다. 이때, AlloSphere는 포개어지는 영역을 자연스럽게 하기 위하여, 포개지는 픽셀들 간의 블렌딩 작업을 수행한다. 해당 블렌딩 작업에 필요한 가중치 또한 캘리브레이션 정보에 포함되어 관리된다.

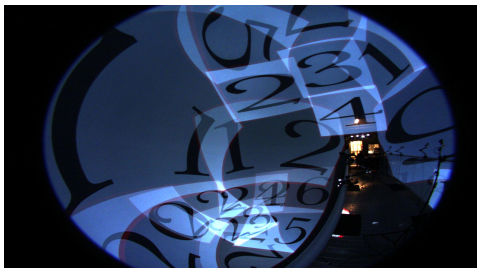


그림 6. 일정 부분 겹쳐지도록 투사된 26개 프로젝션 영역의 어안사진
Fig. 6. Fisheye photograph showing most of the 26 overlapping projection areas

앞에서 설명한 AlloSphere의 디스플레이 서브시스템의 구조 및 동작 방식 중, GR01이 출력할 360도 비디오를 GR02-GR14까지의 13개 워크스테이션으로 브로드캐스트하는 방식은 구현이 용이하다는 장점을 갖지만, 동시에 한계점 또한 존재한다. GR02-GR14 워크스테이션은 360도 영상 내에서 각 워크스테이션에 연결된 2개 프로젝터가 담당하는 영역의 영상 데이터만 GR01로부터 전송받는 것이

아니라 360도 영상 전체를 전송받아 처리하므로, 불필요하게 포함된 데이터 양으로 인하여 전송 비트레이트가 증가한다. 또한 비디오 데이터 디코딩 및 렌더링 프로세스에 소요되는 시간 또한 증가하게 된다. 이러한 처리 방식은 Full HD급 비디오를 처리할 때는 문제가 발생하지는 않지만, 8K 해상도 이상의 고품질 영상 콘텐츠를 처리할 때는 실시간성을 잃게 되는 결과를 불러온다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 본 논문이 제안하는 시스템은 서브픽처 기반의 Viewport-dependent streaming 기법을 AlloSphere 동작 방식에 접목하여, 360도 영상 내에서 각 GR02-GR14 워크스테이션이 요청하는 영역만을 전송하도록 설계되었다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 제안된 시스템은 한국 성균관대학교에 위치한 미디어 서버 CASE에서 동작하는 ServerApp, 미국 UCSB AlloSphere에 위치한 GR01에서 동작하는 SubpicDistributorApp, 그리고 GR02-GR14에서 각각 동작하는 VVC-PlayerApp-AlloSphere, 이 세 종류의 소프트웨어로 구성된다.

ServerApp은 SubpictureDistributorApp과 서버-클라이언트 구조로 통신한다. 이 때, 서버-클라이언트는 한국과 미국 사이의 인터넷망 내 방화벽에 통신이 차단당하지 않도록 TCP 소켓을 사용하여 통신한다. SubpicDistributorApp이 클라이언트로서 접속하면, ServerApp은 다수의 서브픽처로 분할되어 인코딩 된 8K 초고해상도 3DoF 360도 비디오 비트스트림을 SubpicDistributorApp으로 전송한다.

SubpicDistributorApp은 전송받은 비디오 비트스트림을

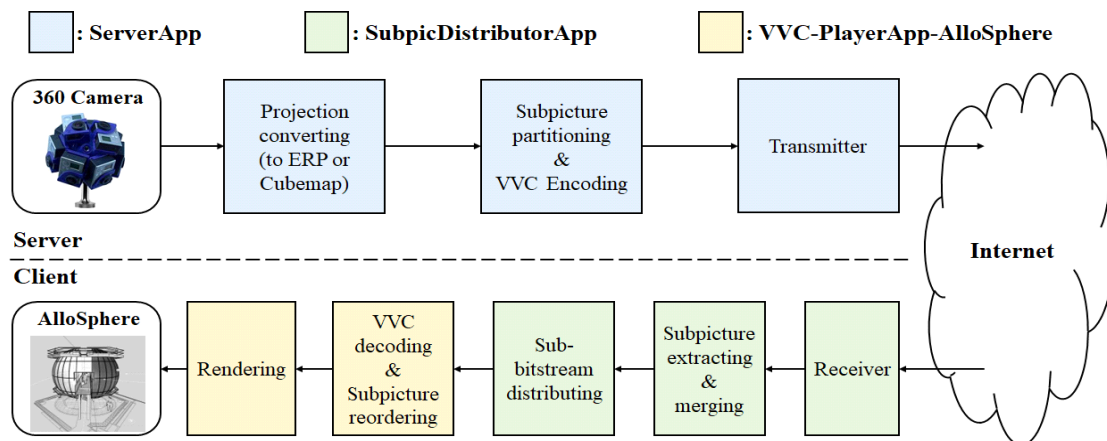


그림 7. 제안된 360도 비디오 스트리밍 시스템의 구성 모듈 및 동작 방식
Fig. 7. The video transmission and processing modules in the proposed 360-degree video system, and their workflow

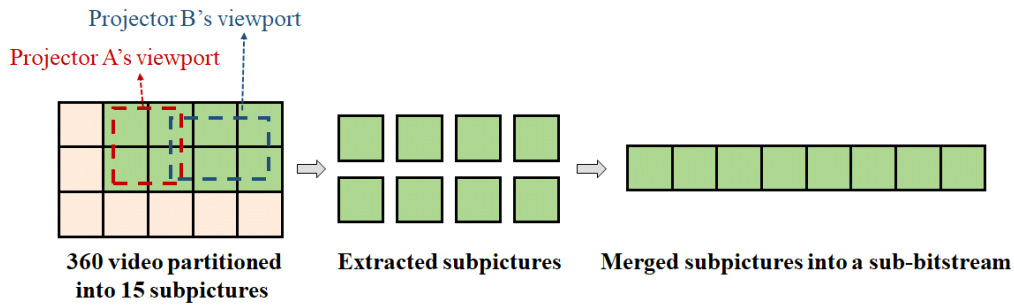


그림 8. 프로젝터 A, B에 연결된 GR을 위한 서브픽처 서브셋 추출 및 서브 비트스트림 재구성
 Fig. 8. Extracting subpictures and reorganizing into sub-bitstream for the GR with projector A and B

파싱하여, 분할된 각 서브픽처를 비트스트림 수준에서 추출한다. 그리고 추출된 서브픽처들을 AlloSphere에서 동작하는 13개 워크스테이션 GR02-GR14를 위한 13개 서브비트스트림으로 재구성한 후, 각 워크스테이션에서 동작하는 VVC-PlayerApp-AlloSphere로 전송한다. 이때, 재구성되는 서브픽처들은 전체 서브픽처 중 각 워크스테이션의 필요 서브픽처 서브셋만으로 구성되어, 최적화된 전송이 이루어질 수 있도록 설계되었다. 각 워크스테이션 GR02-GR14에게 전송할 서브픽처 서브셋은 캘리브레이션 정보를 고려하여, 8K해상도의 ERP 360도 비디오 내에서 각 프로젝터가 투사 담당하는 영역을 계산해 결정한다. 만약 각 프로젝터가 투사 담당하는 영역에 중복된 부분이 있을 경우에는 해당 영역을 중복 전송하는 것이 아니라, 두 프로젝터 투사 담당 영역의 합집합으로 전송할 서브픽처 서브셋을 구성한다. 그림 8은 5×3, 총 15개 서브픽처로 분할된 영상에서 프로젝터 A, B와 연결되어 있는 GR을 위한 서브픽처 서브셋 구성과정을 보여준다. 구성된 서브픽처는 최소 픽셀 개수로 사각형 형태를 유지하기 위하여 1행으로 병합되어 서브 비트스트림으로 재구성된다. 이처럼 추출된 서브픽처 서브셋을 1행으로 병합하는 이유는 SubpicDistributorApp이 VTM 소스코드 내에 존재하는 서브픽처 추출 및 병합 모듈을 활용하여 구현되었기 때문이다. VTM의 서브픽처 병합 모듈은 구현적 제한으로 인하여 서브픽처를 사각형 형태로만 병합할 수 있다. 이 같은 제한은 때때로 서브픽처 병합 시 사각형 형태를 유지하기 위하여 더미 픽셀 데이터를 추가하는 등의 비효율적 처리과정으로 인한 성능 저하를 불러온다. 이 같은 상황을 배제하기 위하여 SubpicDistributorApp은 서브픽처를 1행으로 병합한다. 그림 9는 1행으로 병합된 5개 서브픽처의 예시를 보여준다.



그림 9. 1행으로 병합된 5개 서브픽처 서브셋의 예시
 Fig. 9. An example of the subpicture subset merged into one row

VVC-PlayerApp-AlloSphere는 SubpicDistributorApp으로부터 전송받은 비디오 비트스트림의 디코딩, 픽셀 데이터의 YUV to RGBA 변환, 서브픽처 위치 재조정 작업 수행 후, 프로젝터로 렌더링하는 역할을 수행한다. 서브픽처 위치 재조정은 360도 영상의 렌더링을 위하여, 그림 10과

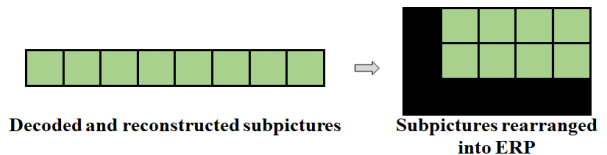


그림 10. 디코딩 된 서브픽처 서브셋의 ERP로의 재배치
 Fig. 10. Rearrangement of the decoded and reconstructed subpicture subset

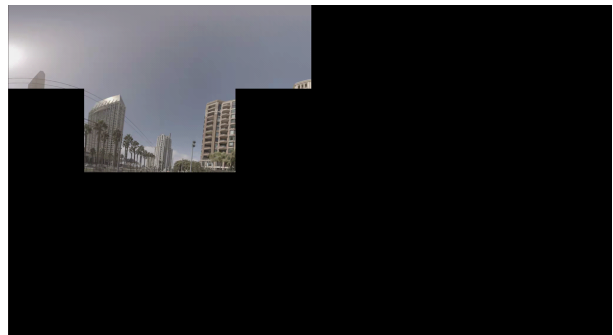


그림 11. ERP 상의 원래 위치로 재배치된 서브픽처의 예시
 Fig. 11. An example of the subpictures rearranged to the original position in ERP

같이 1행으로 병합된 서브픽처를 다시 ERP 상의 원래 위치로 되돌리는 작업이다. VVC-PlayerApp-AlloSphere는 VVdeC를 기반으로 구현되었으며, 4K 및 8K 초고해상도 영상의 실시간 디코딩을 지원한다. 그림 11은 ERP 상의 원래 위치로 재배치된 서브픽처 서브셋의 예시이다.

제안된 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템은 앞에서 설명한 것과 같이, 기존 AlloSphere의 360도 영상 전체를 GR02-GR14 13개 워크스테이션으로 브로드캐스트 하는 방식을 개선하여, 각 워크스테이션이 렌더링하도록 정의되어 있는 360도 영상 내 특정 서브픽처 서브셋만을 전송한다. 이를 통하여 중복된 비디오 데이터의 전송을 최소화하고, 각 워크스테이션에서의 비디오 디코딩 및 렌더링 속도를 향상시킨다. 연구 로드맵 Phase 1에서 구현된 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입은 그림 12와 같이 AlloSphere에서의 시범방송을 통해, 실제 환경에서도 구현된 프로토타입이 원활히 동작함을 확인하였고, Phase 2, 3으로 본 연구를 고도화할 수 있는 연구적 기틀을 마련하였다.



그림 12. 구현된 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입을 활용한 AlloSphere에서의 시범방송
 Fig. 12. Demonstration of the proposed 3DoF 360-degree video streaming system prototype at AlloSphere

IV. 구현된 프로토타입의 성능평가

본 논문은 구현된 스트리밍 시스템 프로토타입의 시범방송과 성능평가를 위하여, 13개 워크스테이션 GR02-GR14에게 각 워크스테이션에 연결된 프로젝터 뷰포트를 고려하

지 않고 360도 영상 전체를 전송하는 기존 방식과 VVC의 서브픽처를 활용한 Viewport-dependent streaming 기법을 적용하여 구현된 스트리밍 시스템 프로토타입의 성능을 비교하는 실험을 수행하였다. 실험은 표 1과 같은 환경에서 수행되었으며, 테스트 시퀀스로는 JVET의 VVC 표준 CTC (Common Test Condition)에 포함되어 있는 Trolley를 테스트 시퀀스로 사용하였다. 그림 13에서 볼 수 있듯이 Trolley 테스트 시퀀스는 ERP 360도 비디오로서 8192×4096의 해상도를 갖는다. 본 논문에서 제안된 서브픽처 기반 Viewport-dependent streaming 기법의 적용을 위하여 해당 테스트 시퀀스는 추출 및 병합이 가능한 다수의 서브픽처로 분할되어 VTM 인코더로 인코딩되었다.

표 1. 실험환경
 Table 1. Experimental environments

CPU	Intel CoreX-series i9-10980XE (3.0 GHz 18 cores, 36 threads)
Memory	48GB
Graphic card	Nvidia GeForce RTX 3080Ti
OS	Ubuntu 18.04



그림 13. 테스트 시퀀스 'Trolley'
 Fig. 13. Test sequence 'Trolley'

서브픽처 분할 개수는 스트리밍 시스템의 전송효율, 비디오 디코딩 및 렌더링 속도, 해당 비디오의 압축효율 등에 영향을 미친다. 360도 영상이 다수의 서브픽처로 잘게 분할될수록 뷰포트 영역 외 낭비되는 비디오 데이터를 최소화하여, 스트리밍 시스템의 전송효율, 비디오 디코딩 및 렌더링 속도 측면에서의 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 분할된 서브픽처의 개수가 증가하면 각 GR을 위한 서브픽처 추출 및 병합을 통한 서브비트스트림 재구성 작업의 소요

시간이 증가하고, 서브픽처 간 경계에서 발생하는 화면 내 예측, 화면 간 예측 성능 저하 및 인-루프 필터 성능 저하 현상이 발생하여 BD-rate 측면에서 손해가 발생할 수 있다. JVET VVC 표준 CTC의 RA (Random Access) 코딩옵션을 적용하여 Trolley 테스트 시퀀스를 2×2, 4×4, 8×8 서브픽처 분할 인코딩을 수행하였을 때, 4×4 총 16개 서브픽처로 영상을 분할한 경우는 2×2 총 4개의 서브픽처로 영상을 분할한 경우보다 약 0.8%의 BD-rate가 감소됨을 확인하였고, 8×8 총 64개 서브픽처로 영상을 분할한 경우는 4×4 서브픽처 분할을 적용한 경우보다 약 3%의 BD-rate가 감소됨을 확인하였다. 이러한 서브픽처 분할 정도에 따른 장단점을

고려하여, 해당 실험에서는 테스트 시퀀스를 8×8, 총 64개의 서브픽처로 분할하여 VTM 인코더로 코딩하였다. 표 2는 해당 테스트 시퀀스의 인코딩을 위하여 사용된 코딩 옵션들을 나타낸다.

성능 비교 결과, 기존에 대형 가상현실 공연장에서 쓰이는 Viewport-independent streaming 기술에 비하여, 구현된 서브픽처 기반 Viewport-dependent streaming 기술을 AlloSphere에 적용하였을 때, 약 80%의 비트율 감소, 약 543%의 영상 디코딩 속도 향상을 표 3과 같이 확인할 수 있다. 각 워크스테이션마다 비트율 감소 정도나 디코딩 속도의 향상 정도가 다른 것은 각 워크스테이션에 연결된 프로젝트 뷰포트에 포함되는 서브픽처 개수가 서로 달라, 실제 전송되는 비디오 데이터 양이 차이가 있기 때문이며, 각 서브픽처 내부 영상 데이터의 복잡도 또한 다르기 때문이다. 이러한 각 워크스테이션에서의 디코딩 속도 차이는 각 워크스테이션에서의 프레임 렌더링 동기화 모듈의 중요성을 대두시키는데, 현재 대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입에는 아직 구현이 되지 않은 상태이다. 해당 프레임 렌더링 동기화 모듈은 향후 Allolib에서 제공하는 UDP 브로드캐스트를 통한 글로벌 타임 동기화 기능을 활용하여 구현되어 적용될 예정이다.

표 2. 테스트 시퀀스 코딩 옵션
 Table 2. Coding options for the test sequence

Test sequence	Trolley
Resolution	8192×4096
Frame-rate	30 fps
360 video projection	ERP
Encoder	VTM-12.0
QP	32
Coding structure	Low delay B
Subpicture partitioning	8×8 (total 64 subpictures)

표 3. 실험 결과
 Table 3. Test results

Graphic renderer	Conventional (Viewport-independent)		Proposed (Subpicture-based viewport-dependent)		Bitrate reduction (%)	Decoding speed enhancement (%)
	Bitrate (kbps)	Decoding speed (fps)	Bitrate (kbps)	Decoding speed (fps)		
GR02	26,638.14	13.45	8,379.78	43.54	68.54	323.72
GR03			12,819.24	38.91	51.88	289.29
GR04			3,121.89	45.26	88.28	336.51
GR05			7,159.99	79.05	73.12	587.73
GR06			7,131.92	79.49	73.23	591.00
GR07			5,397.77	89.18	79.74	663.05
GR08			4,754.86	137.68	82.15	1023.64
GR09			3,887.87	79.57	85.40	591.60
GR10			2,639.61	124.90	90.09	928.62
GR11			4,671.68	74.68	82.46	555.24
GR12			2,324.59	65.52	91.27	487.14
GR13			3,466.86	45.41	86.99	337.62
GR14			2,901.32	47.92	89.11	356.28
Average					80.17	543.96

V. 결 론

본 논문은 일반적으로 사용되는 2D 디스플레이 또는 HMD 기반 VR 서비스에서 탈피하여, 대형 가상현실 공연장을 위한 360도 비디오 스트리밍 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 Phase 1, 2, 3의 연구개발 단계를 밟아 6DoF 시점 자유도를 지원하는 360도 VR 비디오 스트리밍 시스템을 개발하는 것을 최종목표로 하고 있으며, 현재는 Phase 1: 대형 가상현실 공연장을 위한 3DoF 360도 비디오 스트리밍 시스템 프로토타입의 개발까지 완료하였다.

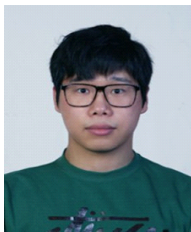
본 논문에서 제안된 시스템은 효율적인 비디오 스트리밍을 위하여, 대형 가상현실 공연장 내 각 프로젝터 뷰포트를 고려하는 서브픽처 기반의 viewport-dependent streaming 기술이 접목되었다. 구현된 스트리밍 시스템 프로토타입의 성능을 분석한 결과, 기존 방식에 비하여 약 80%의 비트율 감소, 약 543%의 디코딩 속도 향상 효과를 확인하였다. 또한, 단순 구현 및 성능평가에서 그치지 않고, 14개 워크스테이션 및 26개 프로젝터로 구성된 대형 가상현실 공연장 UCSB AlloSphere에서의 시범방송을 통하여, 향후 Phase 2, 3을 위한 연구적 발판을 마련하였다. Phase 2에서 진행될 후속연구에서는 3DoF 360도 비디오 실시간 취득 및 스트리밍 기능의 추가 외에도 대형 가상현실 공연장의 특성을 고려한 프로젝터 별 차등적 품질 제어 기술 및 프로젝터 간 동기화 지연시간 최소화 등 사용자 QoE (Quality of Experience)를 최대화할 수 있는 방안에 대한 연구가 진행될 예정이다. 그리고 Phase 3에서는 6DoF 비디오 서비스 제공, 사용자 시점 변화에 따른 영상 렌더링 정확도 및 주관적 품질 평가를 통하여, 고품질의 대형 가상현실 공연장을 위한 6DoF 몰입형 비디오 스트리밍 서비스를 제공할 예정이다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] "BTS to hold virtual concert 'Permission To Dance On Stage' in October," <https://www.ajudaily.com/view/20210915153706063> (accessed Aug. 1, 2022)
- [2] "U.S. Billboard highlighted NCT 127's 'Beyond the Origin!'," <https://www.smentertainment.com/PressCenter/Details/4476> (accessed Aug. 1, 2022)
- [3] SPRI, *Untact Era, Applications of XR (Extended Reality) in Performance Industry*, Monthly Software Oriented Society, Vol.74, 2020.
- [4] J. M. Boyce, R. Doré, A. Dziembowski, J. Fleureau, J. Jung, B. Kroon, B. Salahieh, V. K. M. Vadakital, and L. Yu, "MPEG immersive video coding standard," *Proceedings of the IEEE*, Vol.109, No.9, pp.1521-1536, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3062590>
- [5] Y. Ryu, and E.-S. Ryu, "Overview of Motion-to-Photon Latency Reduction for Mitigating VR Sickness," *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, Vol.15, No.7, pp.2531-2546, 2021.
doi: <https://doi.org/10.3837/tiis.2021.07.013>
- [6] B. Bross, Y. K. Wang, Y. Ye, S. Liu, J. Chen, G. J. Sullivan, and J. R. Ohm, "Overview of the versatile video coding (VVC) standard and its applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.31, No.10, pp.3736-3764, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2021.3101953>
- [7] J. S. Lee, J. T. Park, H. S. Choe, J. H. Byeon, and D. G. Sim, "Overview of VVC," *Broadcasting and Media Magazine*, Vol.24, No.4, pp.10-25, 2019.
- [8] F. Bossen, K. Sühling, A. Wiecekowsky, and S. Liu, "VVC Complexity and Software Implementation Analysis," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.31, No.10, pp.3765-3778, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2021.3072204>
- [9] Y.-K., Wang, R. Skupin, M. M. Hannuksela, S. Deshpande, Hendry, Drugeon, Virginie, R. Sjöberg, B. Choi, V. Seregin, Y. Sanchez, J. M. Boyce, W. Wan, and G. J. Sullivan, "The high-level syntax of the versatile video coding (VVC) standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.31, No.10, pp.3779-3800, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2021.3070860>
- [10] VTM reference software for VVC, https://veggit.hhi.fraunhofer.de/jvet/VVCSoftware_VTM (accessed Aug. 1, 2022)
- [11] Fraunhofer Versatile Video Encoder (VVenC), <https://github.com/fraunhoferhhi/vvenc> (accessed Aug. 1, 2022)
- [12] Fraunhofer Versatile Video Decoder (VVdeC), <https://github.com/fraunhoferhhi/vvdec> (accessed Aug. 1, 2022)
- [13] OpenVVC, <https://github.com/OpenVVC/OpenVVC> (accessed Aug. 1, 2022)
- [14] Fraunhofer HHI, "VVenC Fraunhofer Versatile Video Encoder," VVenC whitepaper, v1.3.1, 2021.
- [15] A. Wiecekowsky, G. Hege, C. Bartnik, C. Lehmann, C. Stoffers, B. Bross, and D. Marpe, "Towards a live software decoder implementation for the upcoming versatile video coding (VVC) codec," *Proceeding of 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp.3124-3128, 2020.
doi: <https://doi.org/10.1109/ICIP40778.2020.9191199>
- [16] T. Amestoy, P. L. Cabarat, G. Gautier, W. Hamidouche, and D. Menard, "OpenVVC: a Lightweight Software Decoder for the Versatile Video Coding Standard," *arXiv preprint arXiv:2205.12217*, 2022.

- doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.12217>
- [17] A. Yaqoob, T. Bi, and G. M. Muntean, "A survey on adaptive 360 video streaming: Solutions, challenges and opportunities," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.22, No.4, pp.2801-2838, 2020.
doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3006999>
- [18] R. Skupin, Y. Sanchez, D. Podborski, C. Hellge, and T. Schierl, "Viewport-dependent 360 degree video streaming based on the emerging Omnidirectional Media Format (OMAF) standard," Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.4592-4592, 2017.
doi: <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8297155>
- [19] J. W. Son, Y. I. Ryu, H. J. Roh, and E. S. Ryu, "SHVC-based ROI tile parallel processing for mobile virtual reality," Proceeding of the Winter Conference of Korea Institute of Information Scientists and Engineers, pp.1715-1717, 2016.
- [20] S. Lee, D. Jang, J. Jeong, and E. S. Ryu, "Motion-constrained tile set based 360-degree video streaming using saliency map prediction," Proceedings of the 29th ACM Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video, pp.20-24, 2019.
doi: <https://doi.org/10.1145/3304112.3325614>
- [21] T. Höllerer, J. Kuchera-Morin, and X. Amatriain, "The allosphere: a large-scale immersive surround-view instrument," Proceedings of the 2007 workshop on Emerging displays technologies: images and beyond: the future of displays and interacton, pp.3-es, 2007.
doi: <https://doi.org/10.1145/1278240.1278243>
- [22] J. Kuchera-Morin, M. Wright, G. Wakefield, C. Roberts, D. Adderton, B. Sajadi, H. Tobias, and A. Majumder, "Immersive full-surround multi-user system design," Computers & Graphics, Vol.40, pp.10-21, 2014.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2013.12.004>
- [23] Allolib, <https://github.com/AlloSphere-Research-Group/allolib> (accessed Aug. 1, 2022)

저 자 소 개



류 영 일

- 2016년 2월 : 가천대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2018년 2월 : 가천대학교 컴퓨터공학 석사
- 2021년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 컴퓨터교육학과 박사과정
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-9210-6245>
- 관심분야 : 멀티미디어 통신 및 시스템, 비디오 압축 표준



김 건 형

- 2008년 : B.S. Electrical & Computer Engineering, Cornell University
- 2016년 : M.S. Media, Arts & Technology, University of California, Santa Barbara
- 2021년 : Ph.D. Media, Arts & Technology, University of California, Santa Barbara
- 2013년 ~ 2021년 : Graduate Student Researcher, AlloSphere Research Group (UCSB)
- 2021년 ~ 2022년 : Staff Research Associate, AlloSphere Research Group (UCSB)
- 2022년 ~ 현재 : Postdoctoral Scholar, AlloSphere Research Group (UCSB)
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-9087-9802>
- 관심분야 : Immersive VR environment, Distributed Rendering, Hyperdimensional Mathematics



Andres Cabrera

- 1998년 7월 : M.M. Universidad de los Andes, Bogata, Columbia
- 2012년 9월 : Ph.D. Queens University, Belfast, U.K.
- 2012년 ~ 2016년 : Lecturer, University of California, Santa Barbara
- 2018년 ~ 2020년 : Adjunct Assistant Professor, University of California, Santa Barbara
- 2016년 ~ 2022년 : CREATE Research Director, University of California, Santa Barbara
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-0503-0658>
- 관심분야 : Spatial Audio, Multimedia systems, Interactivity

저 자 소 개



JoAnn Kuchera-Morin

- 1978년 : B.M. School of Music, Florida State University
- 1980년 : M.M. School of Music, Florida State University
- 1984년 : Ph.D. Eastman School of Music, University of Rochester
- 1984년 ~ 1989년 : Assistant Professor, University of California, Santa Barbara
- 1984년 ~ 현재 : Director, Center for Research in Electronic Art Technology (UCSB)
- 1990년 ~ 1996년 : Associate Professor, University of California, Santa Barbara
- 1995년 ~ 2000년 : Associate Dean of Computing, College of Letters & Science
- 주관심분야 : Integrated media systems design, Interactive, multi-modal content representation, Multimedia composition



정 세 훈

- 2017년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 컴퓨터교육과 재학
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-6308-5609>
- 주관심분야 : 영상신호처리, 영상압축



류 은 석

- 1999년 8월 : 고려대학교 컴퓨터학과 학사
- 2001년 8월 : 고려대학교 컴퓨터학과 석사
- 2008년 2월 : 고려대학교 컴퓨터학과 박사
- 2008년 3월 ~ 2008년 8월 : 고려대학교 연구교수
- 2008년 9월 ~ 2010년 12월 : 조지아공대 박사후과정
- 2011년 1월 ~ 2014년 2월 : InterDigital Labs Staff Engineer
- 2014년 3월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 수석연구원/파트장
- 2015년 3월 ~ 2019년 8월 : 가천대학교 컴퓨터공학과 조교수
- 2019년 9월 ~ 현재 : 성균관대학교 컴퓨터교육과 부교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4894-6105>
- 주관심분야 : 멀티미디어 통신 및 시스템, 비디오 코딩 및 국제 표준, HMD/VR 응용분야